Titel:
Adaptive Prozessführung für die Zerspanung

Adaptive process control for cutting operations

Autoren:
Carsten Hochmuth, Alexander Pierer, Robin Krage 1)
Holger Pätzold, Ralf Gottmann 2)

Institution:
1) Fraunhofer-Gesellschaft; Institut IWU, Chemnitz
2) Schaeffler Technologies AG & Co. KG, Herzogenaurach

Keywords:
Adaptiv, Prozessführung, Drehen, Fräsen, Bohren, Prozessregelung, Prozesskontrolle, Prozessüberwachung

Abstract:
Since a direct measurement of occurring process fluctuations, such as tool wear or microstructure and allowance fluctuations, is not possible, it is necessary to use indirect measurement variables for information acquisition. These can be, for example, the torque-forming current of the main spindle or, in machines where several tools are simultaneously engaged (multi-channel machines), such as machines with two tool slides, the torque-forming current of the feed axes. Due to the interaction between the process conditions and the signals evaluated during the process, the process status can be continuously characterized and influenced by the control system.
The subject of the invention is a novel system for adaptive process control, which operates on the principle of processing the internal drive signals of machine control systems. With the help of this system, unproductive air cuts due to safeties in approach and overflow paths can be minimized and fluctuations in dimensions and microstructure and process instabilities of the running machining can be detected. This makes it possible to always regulate to the maximum of the permissible process parameters - an optimization of productivity and an increase in process stability are the consequences. Furthermore, continuous monitoring and control allows longer tool life due to the prevention of premature tool wear.

Eine direkte Messung von auftretenden Prozessschwankungen, wie Werkzeugverschleiß oder Gefüge- und Aufmaßschwankungen, ist nicht möglich. Aus diesem Grund ist es notwendig indirekte Messgrößen für die Informationsgewinnung zu verwenden. Dies können zum Beispiel der momentenbildende Strom der Hauptspindel sein oder bei Maschinen, bei denen mehrere Werkzeuge gleichzeitig im Eingriff sind (mehrkanalige Maschinen), wie beispielsweise Drehmaschinen mit zwei Werkzeugschlitten, der momentenbildende Strom der Vorschubachsen. Aufgrund der Wechselwirkungen zwischen den Prozessbedingungen und den prozessbegleitend ausgewerteten Signalen kann der Prozesszustand fortlaufend charakterisiert und darauf regelungstechnisch Einfluss genommen werden.
Gegenstand der Erfindung ist ein neuartiges System zur adaptiven Prozessführung, welches nach dem Prinzip der Verarbeitung der internen Antriebssignale von Maschinensteuerungen arbeitet. Mit Hilfe dieses Systems können unproduktive Luftschnitte auf Grund von Sicherheiten in An- und Überlaufwegen minimiert sowie Aufmaß- und Gefügeschwankungen und Prozessinstabilitäten der laufenden Bearbeitung erkannt werden. Damit wird es möglich immer auf das Maximum der zulässigen Prozessparameter zu regeln – eine Optimierung der Produktivität und eine Steigerung der Prozessstabilität sind die Folgen. Durch die

kontinuierliche Überwachung und Regelung können weiterhin auf Grund der Vermeidung von vorzeitigem Werkzeugverschleiß höhere Werkzeugstandzeiten realisiert werden.

Welches technische Problem liegt dem Verfahren zugrunde?

Die kontinuierliche Prozessoptimierung mit dem Ziel der Produktivitätssteigerung an die Stabilitäts- und Leistungsgrenzen von Werkzeugen und Maschinen, nimmt in der Fertigungstechnik und Prozessgestaltung seit Jahren eine übergeordnete Rolle ein. Parallel dazu steigen die Anforderungen an die Prozesse im Hinblick auf die geforderte Qualität und die Herausforderungen durch den Einsatz neuartiger Werkstoffe.
Eine kontinuierliche Überwachung der Prozesse und eine daran angeknüpfte adaptive Regelung der Prozessparameter bieten ein hohes Potenzial zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit und der Prozessstabilität der Verfahren. Dabei werden während der Bearbeitung Kenngrößen aus den Antrieben der Maschine überwacht und in Korrelation mit Zuständen des Prozesses gebracht. Auf Basis dieser Informationen wird regelungstechnisch eingegriffen um hinsichtlich definierter Zielkriterien, wie Produktivität und Qualität, zu optimieren.
Da eine direkte Messung von auftretenden Prozessschwankungen, wie Werkzeugverschleiß oder Gefüge- und Aufmaßschwankungen, nicht möglich ist, ist es notwendig indirekte Messgrößen für die Informationsgewinnung zu verwenden. Dies können zum Beispiel der momentenbildende Strom der Hauptspindel sein oder bei Maschinen, bei denen mehrere Werkzeuge gleichzeitig im Eingriff sind (mehrkanalige Maschinen), wie beispielsweise Drehmaschinen mit zwei Werkzeugschlitten, der momentenbildende Strom der Vorschubachsen. Aufgrund der Wechselwirkungen zwischen den Prozessbedingungen und den prozessbegleitend ausgewerteten Signalen kann der Prozesszustand fortlaufend charakterisiert und darauf regelungstechnisch Einfluss genommen werden.
Gegenstand der Erfindung ist ein neuartiges System zur adaptiven Prozessführung, welches nach dem Prinzip der Verarbeitung der internen Antriebssignale von Maschinensteuerungen arbeitet. Mit Hilfe dieses Systems können unproduktive Luftschnitte auf Grund von Sicherheiten in An- und Überlaufwegen minimiert sowie Aufmaß- und Gefügeschwankungen und Prozessinstabilitäten der laufenden Bearbeitung erkannt werden. Damit wird es möglich immer auf das Maximum der zulässigen Prozessparameter zu regeln – eine Optimierung der Produktivität und eine Steigerung der Prozessstabilität sind die Folgen. Durch die kontinuierliche Überwachung und Regelung können weiterhin auf Grund der Vermeidung von vorzeitigem Werkzeugverschleiß höhere Werkzeugstandzeiten realisiert werden.

Wie wurde dieses Problem bisher gelöst?

Die allgemeine Überwachung von Fertigungsprozessen basiert auf verschiedenen Ansätzen, welche nachfolgend beispielhaft vorgestellt werden. Vorrangig werden indirekte Größen verwendet, um Rückschlüsse auf das Prozessverhalten zu ziehen. Die Überwachung mit Hilfe von indirekten Größen setzt allerdings einen eindeutigen Signalpfad und ausreichend hohe Amplituden voraus. Die ermittelten Informationen aus den Messwerten müssen eindeutig auf den Prozess selbst zurückzuführen sein. Deshalb sind potentielle Störgrößen auf dem Übertragungspfad zu beachten. Bei Prozessen mit geringen Signalamplituden, hoher Dynamik und oder langen Übertragungspfad zum Messpunkt geht die Prozesscharakteristik im Rauschen unter, wird durch die Übertragungsstrecke und Störgrößen verfälscht oder die relevanten Informationen gehen verloren. Eine Auswertung des Signals zum Zweck der Analyse der Prozessgrößen ist dann nicht mehr möglich.
Eine wichtige Kenngröße zur Charakterisierung des Prozesszustands sind die momentenbildenden Ströme der Achsantriebe und deren zeitlicher Verlauf, auf deren Basis kann eine situationsabhängige Regelung aufgebaut werden. Dazu wird der Motorstrom bzw.

die Leistungsaufnahme von Haupt- oder Vorschubantrieben verwendet, um Rückschlüsse auf die Prozesskräfte zu ziehen.

Neben den Regelungssystemen innerhalb der Werkzeugmaschinen selbst kommen zunehmend Fertigungsverfahren mit Prozessregelung zum Einsatz, um die Prozessführung zu optimieren. Über einen geschlossenen Regelkreis werden die relevanten Größen für den Prozessverlauf erfasst und mit Sollwerten verglichen. Entsprechend der Regelabweichung werden schließlich die Regelgrößen konstant gehalten oder über eine Sollkurve geregelt. Ziele sind beispielsweise eine schwingungsfreie Bearbeitung, eine konstante Nutzung der Maschinenleistung und vieles mehr. Anwendungen finden sich dabei sowohl zur automatischen Schnittaufteilung beim Drehen der Ratterbeseitigung beim Fräsen beim Tiefbohren und anderen Verfahren.

Lösungsweg

Die Erfindung beschreibt den Aufbau und die Implementation einer Möglichkeit zur adaptiven Prozessführung an Zerspanungsmaschinen unter Nutzung der internen Antriebsdaten aus der Steuerung.
Die Regelung basiert dabei auf der Auswertung und Verarbeitung der momentenbildenden Motorströme der Vorschubachsen oder der Hauptspindel. Diese stehen im direkten Zusammenhang zur benötigten Schnittkraft bzw. Vorschubkraft.

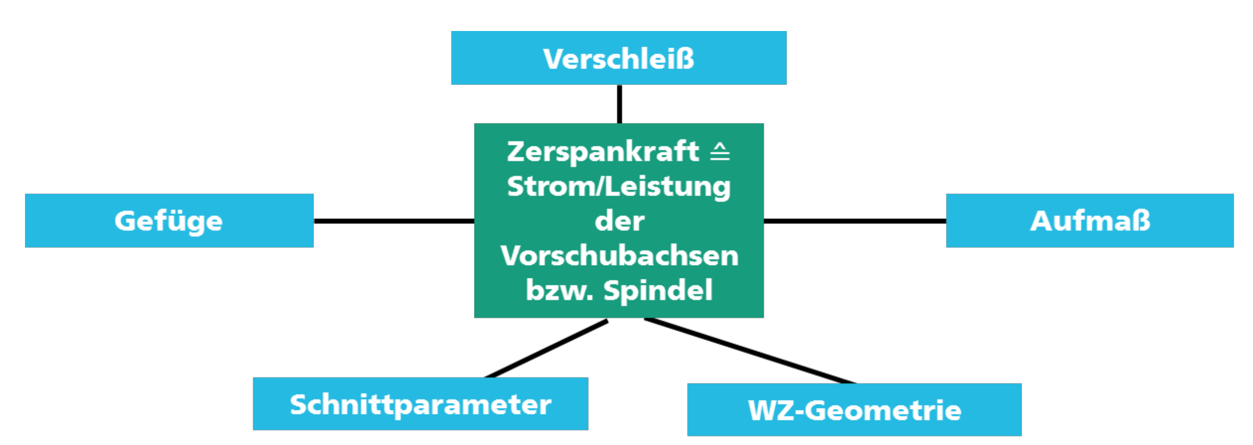


Abbildung 1: Korrelation der Einflussparameter auf die Zerspankraft mit Strom/ Leistung der Vorschubachsen und Hauptspindeln

Dabei kann die Regelung und Überwachung auf einem Signal oder auf Basis mehrerer Signale aufgebaut werden. Die Grundlage für die adaptive Prozessführung bilden dabei die Identifikation der für den abzubildenden Prozess relevanten Signale, die Verknüpfung mit Prozesswissen, die intelligente Datenverarbeitung und die Ableitung von Algorithmen zur Prozessregelung und Prozessüberwachung.

Im Folgenden wird die Umsetzung der Funktionen im Detail beschrieben:

Die adaptive Prozessführung basiert auf einer Überwachung des Stromistwerts in definierten Grenzen. Ziel der adaptiven Regelung ist es dabei den Vorschub oder die Spindelleistung/drehzahl so anzupassen, dass der Stromistwert weitestgehend der Sollvorgabe eines als „in Ordnung“ bewerteten Normschnittes folgt, indem der Override des jeweiligen NC-Kanals entsprechend reguliert wird. Dadurch sollen Chargenschwankungen (z.B. unterschiedliche Aufmaße, Materialeigenschaften) kompensiert werden. Z.B. wird bei gegenüber dem Normschnitt erhöhten Aufmaß der Vorschub reduziert. Für die Sollwertvorgabe können in der Steuerung je NC-Kanal mehrere Sollwertprofile oder auch ein

Festwert hinterlegt werden. Die Sollwerte/ -profile werden anschließend im NC-Programm angewählt. Die Speicherung des Sollwertprofils kann je nach technischen Gegebenheiten im NC-Teil der Steuerung (z.B. R-Parameter, GUD, freie Marker-Variablen) oder in einen Datenbaustein im SPS-Teil der Steuerung erfolgen. Bei der Verwendung von Sollwertprofilen werden diese zunächst während der Bearbeitung eines Normteils (ohne aktivierte Regelung) aufgezeichnet und mittels des PC-Tools „ProfileEditor“ aufgezeichnet. In diesem PC-Tool kann die aufgezeichnete Sollwertkurve nachbearbeitet (z.B. Entfernen von Ausreißern, Glätten mit gleitendem Mittelwert, …) und in die Steuerung zurückgespielt werden.

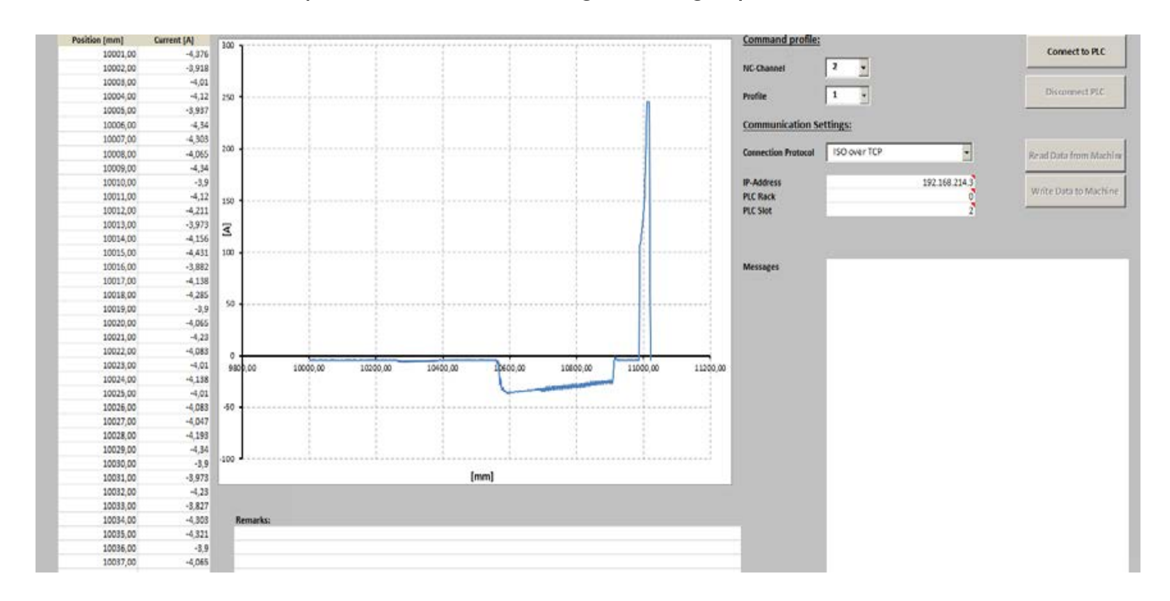


Abbildung 2: ProfileEditor mit Beispielbearbeitung

Die Zuordnung der zu regelnden Prozessgrößen (z.B. Spindelleistung/-strom, gemessene Prozesskräfte/-momente, Strom/Leistung Vorschubachsen) zur Stellgröße (Override Achsvorschub/ additives Motormoment/Positions-Offset, Spindelleistung/-drehzahl) ist, auch über NC-Kanal und Achs-Grenzen hinweg, frei zuordenbar. Zum Beispiel ist es möglich den Achsvorschub auf Basis des Spindelstroms/-leistung zu regeln.
Einbindung externer Sensoren (z.B. Kraftmesssensoren, Vibrationssensoren, Barkhausenrauschen, 3MA) ist dank generischer Funktionsstrukturen ebenfalls möglich.

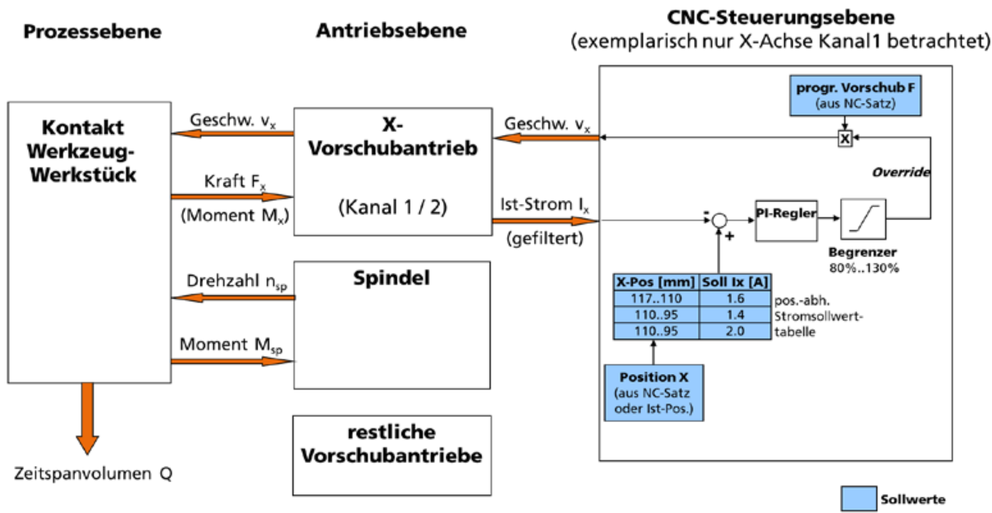


Abbildung 3: Regelungstopologie am Beispiel der Regelung auf Sollstrom einer Vorschubachse 1/2

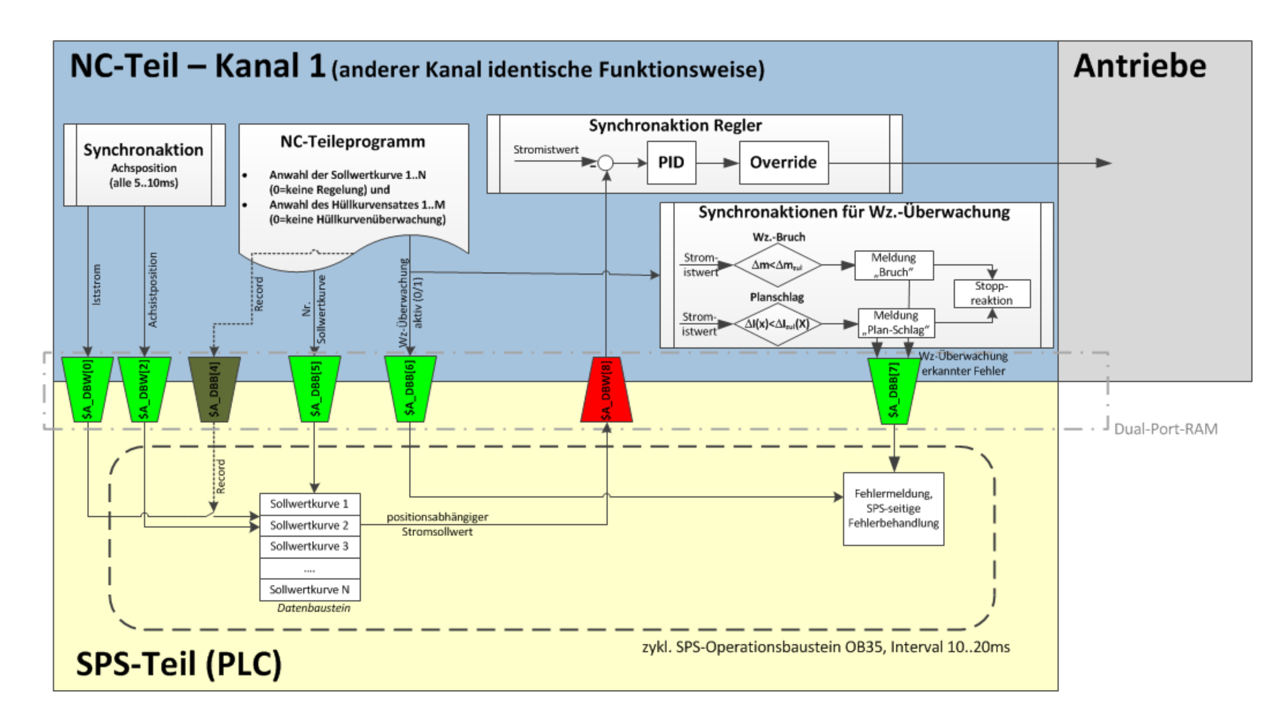


Abbildung 4: Regelungstopologie am Beispiel der Regelung auf Sollstrom einer Vorschubachse 2/2

Zur Kommunikation werden folgende Schnittstellenvariablen verwendet:

Regelung:

Parameter	Beschreibung
`R70`	Regelung aktiv (Freigabe/Anwahl einer Sollwertkurve & Istposition zwischen `MIN_POS_CTRL ..MAX_POS_CTRL` & keine Aufzeichnung eines Sollwertprofils)
`R71`	Interne Rechengröße für den Integral-Anteil des Reglers. Physikalische Einheit ist [%].
`R72`	Interne Rechengröße für den Proportional-Anteil des Reglers. Physikalische Einheit ist [%].
`R73`	Reserve
`R74`	Stellgröße am Reglerausgang (errechneter Override wird in Systemvariable `$AC_OVR` (Kanal-Override) geschrieben). Physikalische Einheit ist [%]
`R75`	Stromsollwert (Betrag) in [A]

DualPortRam	**Kanal1**	**Kanal2**
Byte-Nr.		
$A_DBW[0]	Iststrom [mA]	
	Iststrom [mA]	
$A_DBW[2]	Achsistposition [1/100 mm]	
	Achsistposition [1/100 mm]	
$A_DBB[4]	Aufzeichnung (RecordSignal) [0/1]	
$A_DBB[5]	Nr. Sollwertkurve [1..3, 0=aus]	
$A_DBB[6]	Wz.-Überwachung aktiv (0/1)	
$A_DBB[7]	Kode erkannter Fehler [0= kein Fehler, 1=Planschlag, 2=Wz-Bruch klein, 2=Wz.-Bruch groß	

$A_DBW[8]	positionsabh. Stromsollwert [mA]	
	positionsabh. Stromsollwert [mA]	
$A_DBW[10]	Soll-Standzeit des Werkzeugs Kanal 1	
$A_DBW[12]	Rest-Standzeit des Werkzeugs Kanal 1	
18		
19		
$A_DBW[20]		Iststrom [mA]
		Iststrom [mA]
$A_DBW[22]		Achsistposition [1/100 mm]
		Achsistposition [1/100 mm]
$A_DBB[24]		Aufzeichnung (RecordSignal) [0/1]
$A_DBB[25]		Nr. Sollwertkurve [1..3, 0=aus]
$A_DBB[26]		Wz.-Überwachung aktiv (0/1)
$A_DBB[27]		Kode erkannter Fehler [0= kein Fehler, 1=Planschlag, 2=Wz-Bruch klein, 2=Wz.-Bruch groß
$A_DBW[28]		positionsabh. Stromsollwert [mA]
		positionsabh. Stromsollwert [mA]
$A_DBW[30]		Soll-Standzeit des Werkzeugs Kanal 2
$A_DBW[32]		Rest-Standzeit des Werkzeugs Kanal 2
$A_DBW[40]	Drehzahlsollwert 1 S110	
$A_DBW[42]	Drehzahlsollwert 2 S110	
$A_DBW[44]	Drehzahlsollwert 3 S110	
$A_DBW[46]	Positionssollwert S110	

Variable	Funktion	SPS Adresse
$A_IN[38]	Zielposition erreicht	DB10.dbx129.5
$A_IN[40]	Drehzahlsollwert erreicht	DB10.dbx129.7
M32	Start Drehzahlbetrieb 1	DB21.DBX198.0
M33	Start Drehzahlbetrieb 2	DB21.DBX198.1
M34	Start Drehzahlbetrieb 3	DB21.DBX198.0
M35	Stopp Drehzahlbetrieb/Positionierung	DB21.DBX198.1

M36	Start Parameterübertragung	DB21.DBX198.2

Welche Wirkungen und welche Vorteile hat das neu entwickelte Regelungskonzept? Was ist aus Ihrer Sicht der wichtigste Vorteil?

Das Regelungskonzept als Kern der Erfindung ist ein Enabler zur Nutzung neuartiger Wirkprinzipien für eine Prozessüberwachung und –regelung von produktionstechnischen Fertigungsverfahren. Dadurch ist es möglich sowohl bisher nicht erfassbare Prozesszustände zu identifizieren und Regelungen für bisher ungeeignete Verfahren mit parallel starfindender mehrkanaliger Bearbeitung zu etablieren.
Mit Hilfe der Prozessregelung wird die Reproduzierbarkeit und Prozesssicherheit gesteigert und insbesondere bei steigendem Automatisierungsgrad der Produktionssysteme die Leistungsfähigkeit moderner Fertigungsprozesse deutlich gesteigert.
Im Rahmen der Prozessentwicklung und Auslegung steht ein zusätzliches Werkzeug zur Verfügung, um den Prozess anhand der auftretenden Prozesszustände und Effekte, welche durch das System transparent und quantitativ ausgewertet werden, gezielt auszulegen.
Weitere Vorteile sind die Anfertigung von Fertigungsprotokollen mit Prozessdaten für zum Beispiel sicherheitsrelevante Bauteile oder die Möglichkeit der prozessdatenbezogenen Fernwartung von Produktionssystemen bzw. Prozessketten.

Technisches Anwendungsgebiet?

Das technische Anwendungsgebiet erstreckt sich auf alle produktionstechnischen Fertigungsverfahren.